

Економно легована сталь для потреб гірничодобувної промисловості

Шаломєєв В. А., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри, shalomeev@radiocom.net.ua

Лютова О. В., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри, liutova@zp.edu.ua

Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя

Простої млинів кульового розмелювання (МКР) за рахунок низької стійкості литих деталей становлять 70...80 % від загальної кількості простоїв, при цьому матеріальні збитки обчислюються сотнями тисяч гривень. Одними з найслабших вузлів цих млинів є розвантажувальні решітки та черпаки равликового живильника, стійкість яких досягає відповідно 5,5...6 місяців та 1,0...1,5 місяці, при ресурсі роботи інших деталей млина 9...12 місяців.

В результаті аналізу умов експлуатації решіток і черпаків МКР встановлено, що тривалість експлуатації та механічні властивості цих деталей залежать переважно від матеріалу, з якого вони виготовляються. Сталі, які мають високий рівень пластичності і в'язкості (35ГФЛ, 35ХНЛ, 34ХНМЛ) характеризуються недостатньою зносостійкістю внаслідок низьких показників міцності та твердості. Матеріали з високим рівнем твердості та міцності (60Х2СМЛ), мають низьку ударну в'язкість, що було причиною аварійних зупинок млинів. Проведенням аналізом механічних властивостей черпаків і решіток, встановлено необхідний рівень властивостей цих деталей: $\sigma_b \geq 850$ МПа; $HV \geq 2600$ МПа; $\delta \geq 8$ %; $\psi \geq 20$ % та $KCU \geq 0,20$ МДж/м².

Визначено вплив зміни вмісту кремнію на механічні властивості та зносостійкість сталі, що містить 1,5 % хрому та 0,40 % марганцю з різним вмістом вуглецю. Зі збільшенням вмісту кремнію зростають показники міцності та твердості. Вплив кремнію на пластичні властивості сталі, ударну в'язкість та зносостійкість носить нелінійний характер. При 0,9 % марганцю спостерігається монотонне зниження не тільки пластичних властивостей та ударної в'язкості, але й зносостійкості. Це пояснюється тим, що у сталі зі збільшенням вмісту марганцю підвищується ліквідаційна неоднорідність та стійкість переохолодженого аустеніту, що призводить після нормалізації до утворення мартенситоподібної структури. Показано, що при виробництві виливків, що працюють в умовах абразивного зношування у поєднанні з ударними навантаженнями, доцільно дотримуватися співвідношення кремнію до вуглецю 2,0...2,5. Математичне планування експерименту дозволило отримати моделі, що адекватно описують вплив складу сталі на рівень її механічних та експлуатаційних властивостей. На підставі обробки отриманих даних із застосуванням програмного комплексу «STATISTICA» запропоновано зносостійку економно леговану сталь наступного складу: 0,45...0,50 % вуглецю; 1,7...2,0 % хрому; 0,5...0,7 % марганцю; 1,2...1,5 % кремнію. Застосування такого складу сталі для виготовлення розвантажувальних решіток та черпаків равликового живильника дозволило збільшити терміни їх експлуатації в 1,5 рази за рахунок підвищення експлуатаційних властивостей, і, як наслідок, зменшити міжремонтний

цикл млинів кульового розмелювання, що сприяло підвищенню економічної ефективності виробництва.

Ключові слова: млин кульового розмелювання, легована сталь, математичне моделювання, структура, механічні властивості.

Передчасний вихід із ладу окремих деталей і вузлів гірничодобувного обладнання лімітує тривалість нормальної експлуатації устаткування, зумовлює збільшення випуску запасних частин, зростання транспортних витрат, веде до скорочення обсягів робіт і знижує ефективність виробництва [1-3].

При переробці руди у гірничодобувній промисловості широко застосовуються млини кульового розмелювання (МКР), що виконують основну роботу в технологічному процесі подрібнення руд. Литі деталі млинів працюють у важких умовах гідроабразивного зношування в поєднанні з ударними навантаженнями.

Зазвичай, термін служби будь-якого устаткування або машини залежить від довговічності лише кількох відповідальних деталей, які в процесі експлуатації зазнають зношування, і тому для забезпечення надійної та економічної роботи устаткування основну увагу слід приділяти підвищенню стійкості саме таких деталей.

В результаті проведеного аналізу встановлено, що простой млинів кульового розмелювання внаслідок низької стійкості литих деталей становлять 70...80 % від загальної кількості простоїв, при цьому матеріальні збитки обчислюються сотнями тисяч гривень. Одними з найслабших вузлів цих млинів є розвантажувальні решітки та черпаки равликового живильника, стійкість яких сягає відповідно 5,5...6,0 місяців та 1,0...1,5 місяці, при ресурсі роботи інших деталей млина 9...12 місяців. Характерні види зношування та пошкоджень черпаків і решіток наведені на рис. 1.

На різних ливарних заводах гірничодобувної промисловості ці виливки виробляються з різноманітних литих сталей (110Г13Л, 60Х2СМЛ, 35ХНЛ, 34ХНМЛ, тощо), що містять дефіцитні нікель і молібден, що також знижує економічні показники промислового виробництва.

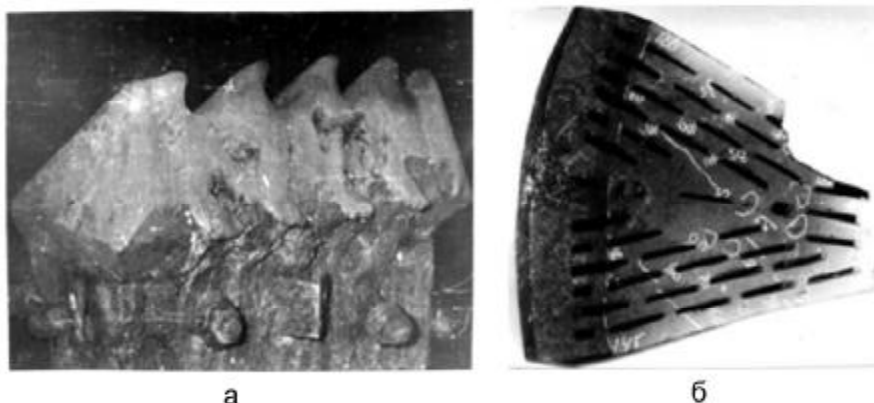


Рис. 1. Характерні види зношування черпака (а) та руйнування решітки (б). $\times 0,15$.

Fig. 1. Scoop wear types (a) and grid (б) destruction $\times 0.15$.

Сталь

В результаті аналізу умов експлуатації решіток і черпаків МКР встановлено, що тривалість експлуатації та механічні властивості цих деталей залежать переважно від матеріалу, з якого вони виготовляються (табл. 1). Сталі з високим рівнем пластичності і в'язкості (35ГФЛ, 35ХНЛ, 34ХНМЛ) мають недостатню зносостійкість внаслідок низьких показників міцності та твердості. Матеріали з високим рівнем твердості та міцності (60Х2СМЛ), мають низьку ударну в'язкість, що було причиною аварійних зупинок млинів. Проведеним аналізом механічних властивостей черпаків і решіток, встановлено необхідний рівень властивостей цих деталей: $\sigma_b \geq 850$ МПа; $HV \geq 2600$ МПа; $\delta \geq 8\%$; $\psi \geq 20\%$ та $KCU \geq 0,20$ МДж/м².

Таблиця 1

Механічні властивості, причини виходу з ладу та середня експлуатаційна стійкість решіток та черпаків

Table 1

Mechanical properties, causes the failure and average operational stability of grids and scoops

Марка сталі	Механічні властивості						Середня стійкість деталей, місяців
	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, МДж/м ²	HV, МПа	
110Г13Л	700-730	380-415	22,6-26,3	21,4-25,2	2,2-3,4	2000-2150	решітка – 7 черпак – 1
60Х2СМЛ	850-900	670-727	6,0-7,5	16,2-18,3	0,14-0,16	2600-2700	решітка – 6,5...7
35ХНЛ	690-735	475-510	17,0-19,2	34,0-38,2	0,66-0,82	2050-2200	решітка – 6
34ХНМЛ	765-790	490-530	14,4-16,2	38,8-41,3	0,70-0,85	2100-2310	решітка – 6
40ХЛ	680-710	435-460	8,0-15,0	20,0-24,4	0,20-0,32	2100-2250	решітка – 5,5 черпак – 1,5
35ГФЛ	760-950	500-540	18,0-20,4	37,0-40,5	0,60-0,72	2150-2340	решітка – 6

Мета роботи полягала у розробці складу та технології виробництва економнолегованої сталі з високими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями.

Дослідні плавки сталей проводили в індукційних печах з основним футеруванням ємністю 60 кг і 120 кг. При вивченні впливу хімічного складу на властивості сталі використовували метод порційного розливання, що дає можливість на металі одного вихідного складу визначити вплив легуючих елементів, що досліджуються.

У процесі експерименту визначалися механічні властивості за стандартними методиками. Випробування на гідроабразивне зношування сталі проводили на напівпромисловому кульовому млині при помелі кварцевого щебеню фракції 20...25 мм протягом 120 годин. Зразки для визначення

Сталь

механічних властивостей і зносостійкості піддавалися нормалізації від 880 °С протягом 4 годин та відпуску при 650 °С протягом 6 годин.

При розробці складу економнолегованої сталі використовували метод повного факторного експерименту 24 (табл. 2). В якості незалежних змінних обрано вуглець, хром, марганець та кремній, діапазони варіювання яких обрані згідно літературних даних.

Таблиця 2

Матриця планування експерименту з вивчення впливу хімічного складу на властивості сталі

Table 2

Matrix for planning an experiment to study the effect of chemical composition on the properties of steel

Умови варіювання досліджуваних факторів		Досліджувані фактори, %				Функції досліджуваних факторів					
		<i>C</i>	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>						
Основний рівень	0	0,41	1,00	0,90	0,90	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	КCU, МДж/м ²	HB, МПа	ε
Інтервал варіювання	(Δ)	0,05	0,70	0,50	0,60						
Верхній рівень	(+)	0,46	1,70	1,40	1,50						
Нижній рівень	(-)	0,36	0,30	0,40	0,30						
Кодове позначення змінних	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4						

Статистичну обробку даних проводили із застосуванням програмного комплексу «STATISTICA», додаткову перевірку надійності отриманих функціональних залежностей здійснено методом розрахунку [4] коефіцієнта множинної кореляції (R).

Після переходу до натуральних змінних отримані наступні рівняння:

$$\begin{aligned} \sigma_B &= 113,76Mn - 105,74Cr + 127,58Si + 115,74C + 664,29CrC - \\ &- 61,67MnSi + 425,21, \text{МПа}; \quad R=0,96; \\ \delta &= 14,7 - 0,21Mn - 2,83Si + 5,17C - 3,31CrMn + 2,83CrSi - 42,57CrC \\ &+ 17,97, \%; \quad R=0,96; \\ \psi &= 0,34Mn - 1,52Cr - 2,36Si - 38,8C - 3,54CrMn + 2,36CrSi \\ &+ 47,19, \%; \quad R=0,90; \\ HB &= 48,58Cr + 625,71Mn + 560,71Si + 596,43C - 348,21CrMn - \\ &- 348,21CrSi + 1928,57CrC - 386,9MnSi + 386,9CrMnSi + 689,47, \text{МПа}; \\ &R=0,95; \\ KCU &= 0,08Mn - 0,18Cr - 0,09Si - 0,98C - 0,08CrMn + 0,07CrSi + \\ &+ 1,02, \text{МДж/м}^2; \quad R=0,95; \\ \varepsilon &= 0,47Cr + 0,18Mn + 0,35Si + 1,22C - 0,14CrMn - 0,29CrSi - \\ &- 0,64CrC - 0,71SiC + 0,71CrSiC + 0,45, \quad R=0,98. \end{aligned}$$

З рівнянь видно, що вуглець, хром, марганець і кремній в межах, що вивчаються, позитивно впливають на показники міцності, твердості і зносостійкості, найбільш суттєво впливають – вуглець, хром і кремній. Що ж до пластичності, то хром разом із марганцем знижують її, а хром разом із кремнієм – підвищують.

При розв'язуванні отриманої системи рівнянь з максимальними значеннями функцій відгуку, отримані наступні значення незалежних змінних: $C = 0,46 \%$, $Cr = 1,53 \%$, $Mn = 0,9 \%$, $Si = 0,76 \%$. Аналіз рівнянь регресії показав, що вплив кремнію має неоднозначний характер, тому досліджували вплив кремнію на властивості та формування структури сталі при вмісті $1,5 \%$ Cr , $0,4 \%$ і $0,9 \%$ Mn та $0,36 \%$, $0,46 \%$ мас. C (рис. 2).

Зі збільшенням вмісту кремнію зростають показники міцності та твердості. Вплив кремнію на пластичні властивості сталі, ударну в'язкість та зносостійкість носить нелінійний характер, що узгоджується з даними досліджень [5]. Найбільш високий рівень цих показників мають сталі із вмістом кремнію $0,8 \%$ та $1,0 \%$ при вмісті вуглецю $0,36 \%$ та $0,46 \%$ відповідно, тобто щодо відношення кремнію до вуглецю $2,0 \dots 2,5$.

Металографічні дослідження показали, що в сталі, що містить $0,20 \%$ кремнію після нормалізації типова перліто-феритна структура (рис. 3 а).

Збільшення вмісту кремнію призводить до підвищення стійкості переохолодженого аустеніту, і при охолодженні на повітрі підвищується дисперсність перліта (рис. 3 б). Подальше підвищення вмісту кремнію до $0,8 \%$ для $0,36 \%$ вуглецю та $1,0 \%$ для $0,46 \%$ вуглецю призводить до стану, коли надлишковий ферит практично відсутній, у структурі сталі спостерігається типова бейнітна структура з мікротвердістю 3400 МПа (рис. 3 в). У сталі з більш високим вмістом кремнію основним елементом структури є голчастий бейніт з мікротвердістю 4200 МПа (рис. 3, г), що негативно позначається на пластичних властивостях сталі.

При вмісті марганцю $0,9 \%$ спостерігалось монотонне зниження як пластичних властивостей і ударної в'язкості, так й зносостійкості. Це пояснюється тим, що у сталі зі збільшенням вмісту марганцю підвищується ліквідаційна неоднорідність та стійкість переохолодженого аустеніту, що

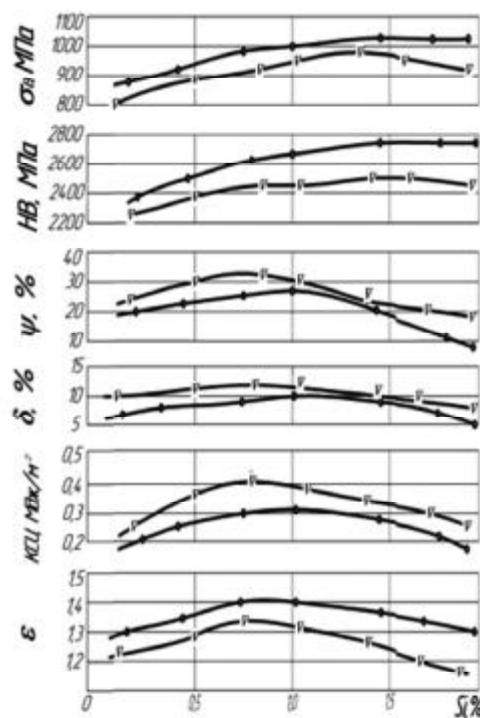


Рис. 2. Вплив кремнію на механічні властивості сталі. $0,36 \%$ вуглецю, $0,46 \%$ вуглецю.

Fig. 2 .The influence of silicon on the mechanical properties of steel. 0.36% carbon, 0.46% carbon.

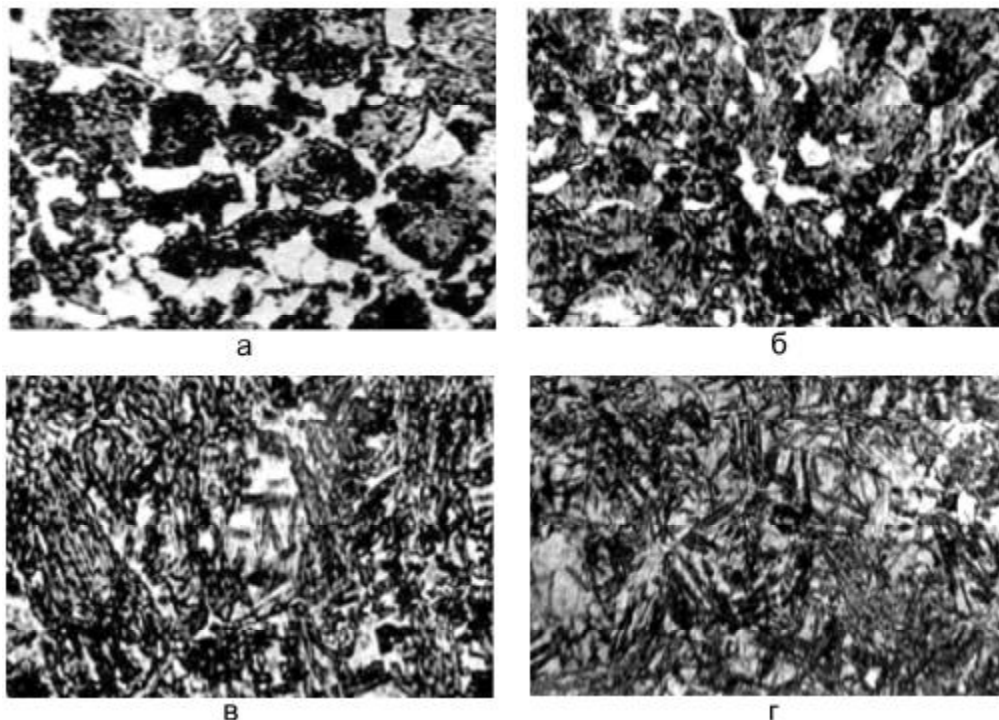


Рис. 3. Вплив вмісту кремнію на структуру сталі, що містить 0,46 % вуглецю; 1,5 % хрому; 0,40 % марганцю. Після нормалізації від 880 °С (×340): а – 0,20 % кремнію, б – 0,68 % кремнію, в – 1,0 % кремнію, г – 1,77 % кремнію.

Fig. 3. The influence of silicon content on the structure of steel containing 0.46 % carbon; 1.5 % chromium; 0.40 % manganese. After normalization from 880 °C (× 340): а – 0.20% silicon, б – 0.68% silicon, в – 1.0% silicon, г – 1.77% silicon.

призводить після нормалізації до утворення мартенситоподібної структури (рис. 4 а).

Добавки кремнію призводять до поступового укрупнення мартенситоподібної структури (рис. 4 б, в), при цьому спостерігається різна травність мартенситу, обумовлена розвитком лікваційних провисів і, як наслідок, нерівномірною мікротвердістю різних ділянок структури (темна складова 6200 МПа; світла – 7900 МПа).

Можливість утворення подібних структур при безперервному охолодженні легованих сталей відзначається Г. Е. Тоттен [6]. Така неоднорідність структури призводить до нерівномірного розподілу карбідної фази після відпуску (рис. 5 а), при вмісті ж марганцю 0,4 % забезпечується рівномірна дисперсність перліту (рис. 5 б) і, як наслідок, краще поєднання механічних властивостей та зносостійкості.

Одержані результати досліджень щодо легування добре узгоджуються з математичною моделлю впливу кремнію та марганцю на властивості сталі та зносостійкість. Встановлено, що для отримання високого комплексу властивостей пластичності, міцності та зносостійкості необхідно підтримувати співвідношення кремнію до вуглецю в межах 2,0...2,5, при обмеженні вмісту марганцю. Виходячи з аналізу літературних

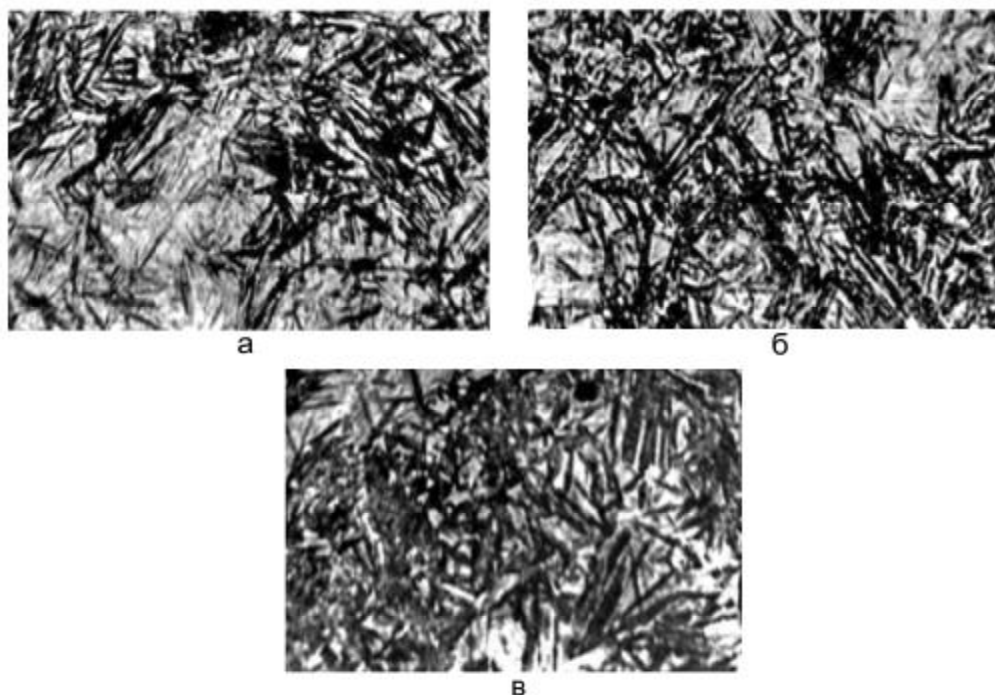


Рис. 4. Вплив вмісту кремнію на структуру сталі (0,46 % С; 1,5 % Cr; 0,90 % Mn) після нормалізації від 880 °С. а – 0,20 % кремнію, б – 0,93 %, в – 1,77 %. $\times 340$.

Fig. 4. The influence of silicon content on the structure of steel (0.46 % C; 1.5 % Cr; 0.90 % Mn) after normalization from 880 °C. а – 0.20% silicon, б – 0.93%, в – 1.77%. $\times 340$.

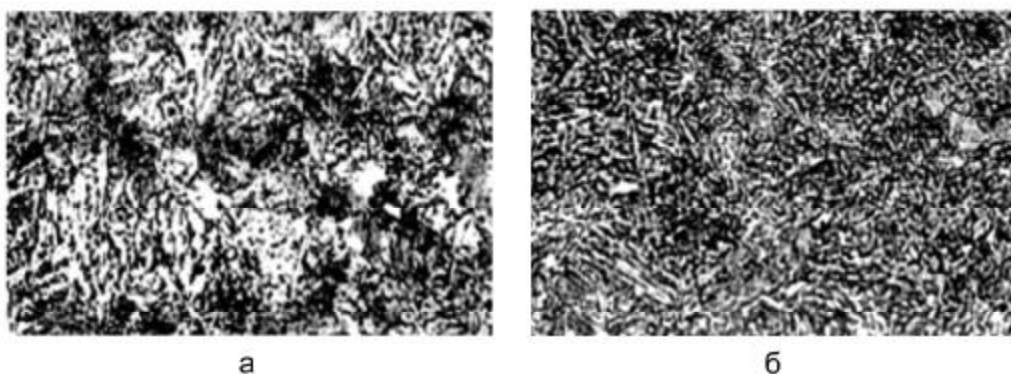


Рис. 5 Вплив високого відпуску на вихідну структуру сталі. $\times 340$.

Fig. 5 The influence of high tempering on the initial steel structure. $\times 340$.

даних, рівнянь регресії та даних програмного комплексу «STATISTICA» з оптимізації, остаточний склад зносостійкої економно легованої сталі: 0,45...0,50 % С; 1,7...2,0 % Cr; 0,5...0,7 % Mn; 1,2...1,5 % Si. Це забезпечує наступний рівень властивостей: σ_B – складає 1000...1200 МПа; HB – 2600...2800 МПа; δ – 8...10 %; ψ – 25...28 %; KCU – 0,25...0,30 МДж/м² та $\epsilon = 1,4$. Такий комплекс властивостей задовольняє та перевищує показники

використовуваних стандартних сталей (табл. 1). Застосування такого складу сталі для виготовлення розвантажувальних решіток та черпаків равликового живильника дозволило збільшити терміни їх експлуатації в 1,5 рази за рахунок підвищення експлуатаційних властивостей, і, як наслідок, зменшити міжремонтний цикл млинів кульового розмелювання, що сприяло підвищенню економічної ефективності виробництва.

Література

1. Скуратовський А. К., Яхно М. Н. Підвищення довговічності конструкційних елементів машин при використанні порошкових композиційних матеріалів типу ЖЧ25Х3 // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2010. – № 6. – С.107-110.
2. Тюрин С. И. Повышение эффективности эксплуатации горного оборудования за счет внедрения новых технологий ремонта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 5. – С. 136-148.
3. Жуматаев А. К., Олжабаев Р. О. Повышение надежности оборудования // Наука и техника Казахстана. – 2010. – № 2. – С. 52-54.
4. Олшанецкий В. Е. О физических подходах к математическому моделированию функциональных связей // Нові матеріали в металургії та машинобудуванні. – 2003. – № 1. – С. 80-86.
5. Маковецкий А. Н., Мирзаев Д. А., Мирзоев А. А., Окишев К. Ю. Особенности и физические принципы влияния добавок кремния на свойства стали // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2017. – Т. 17. – № 4. – С. 38-48. <https://doi.org/10.14529/met170404>
6. Totten G. E. Steel heat treatment. Metallurgy and Technologies. – New York: Taylor and Fancis Group, 2006. – 821 p. <https://doi.org/10.1201/NOF0849384523>

References

1. Skuratovskyi A. K., Yakhno M. N., *Naukovi visti NTUU «KPI»*, 2010, No. 6, pp. 107-110. [in Ukrainian].
2. Tiurin S. I., *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten*, 2016, No. 5, pp. 136-148. [in Russian].
3. ZHumataev A. K., Olzhabaev R. O., *Nauka i tekhnika Kazahstana*, 2010, No. 2, pp. 2-54. [in Russian].
4. Ol'shaneckij V. E., *Novi materialy v metalurhii ta mashynobuduvanni*, 2003, No. 1, pp. 80-86. [in Russian].
5. Makoveckij A. N., Mirzaev D. A., Mirzoev A. A, Okishev K. Yu., *Vestnik YUUrGu. Seriya «Metallurgiya»*, 2017, Vol. 17, No. 4, pp. 38-48. [in Russian]. <https://doi.org/10.14529/met170404>.
6. Totten, G. E. Steel heat treatment. *Metallurgy and Technologies*, New York, Taylor and Fancis Group, 2006. 821 p. [in English]. <https://doi.org/10.1201/NOF0849384523>.

Одержано 25.01.22

Shalomeev V. A., Liutova O. V.

Economically alloyed steel for the needs of the mining industry

Summary

It has been established that the downtime of ball mills due to the low durability of cast parts is 70...80 % of the total number of downtime, while material damage is estimated in hundreds of thousands of hryvnia. One of the weakest units of these mills are the discharge grids and scoops of the cochlear feeder, the durability of which reaches 5.5...6 months and 1.0...1.5 months, respectively, with the resource of operation of other parts of the mill 9...12 months.

As a result of the analysis of the operating conditions of the gratings and scoops of the MSHR, it was found that the duration of operation and the mechanical properties of these parts depend mainly on the material from which they are made. Steel with a high level of plasticity and toughness (35GFL, 35HNL, 34HNML, etc.) had insufficient wear resistance due to low strength, hardness. Materials with a high level of hardness and strength (60Kh2SML) had a low impact toughness, which was the reason for emergency shutdowns of the mills as a result of breakdowns of parts. The analysis of the mechanical properties of ladles and gratings has established the required level of properties of these parts; $\sigma_B \geq 850$ MPa; $HB \geq 2600$ MPa; $\delta \geq 8$ %; $\psi \geq 20$ %, $KCU \geq 0,20$ MJ/m².

The effect of changing the silicon concentration on the mechanical properties and wear resistance of steel containing 1.5 % chromium and 0.40 % manganese with different carbon contents has been studied. With an increase in the silicon content, the strength and hardness indicators increase. The effect of silicon on the plastic properties of steel, impact strength and wear resistance is nonlinear, with 0.9 % manganese in this case, a monotonic decrease is observed not only in plastic properties and toughness, but also in wear resistance. This is explained by the fact that with an increase in the manganese content in steel, the segregation heterogeneity and stability of supercooled austenite increase, leading, after normalization, to the formation of a martensite-like structure. It is shown that in the production of castings operating under conditions of abrasive wear in combination with shock loads, it is advisable to observe the ratio of silicon to carbon 2.0...2.5.

Mathematical planning of the experiment made it possible to obtain models that adequately describe the effect of the composition of steel on the level of its mechanical and operational properties. Based on the processing of the data obtained from the «STATISTICA» software package, a wear-resistant economically alloyed steel of the following composition was proposed: 0.45...0.50 % carbon; 1.7...2.0 % chromium; 0.5...0.7 % manganese; 1.2...1.5 % silicon. The use of such a composition of steel for the manufacture of unloading gratings and scoops of snail feeder allowed to increase their service life by 1.5 times by improving performance, and, consequently, reduce the maintenance cycle of ball mills, which increased economic efficiency.

Keywords: ball grinding mill, alloy steel, mathematic modeling, structure, mechanical properties.